

10. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. – М.: Металлургиздат, 1962. – 567 с.
11. Metallurgical heat engineering. T.1. Theoretical foundations: textbook for universities / Krievandin V.A., Arutyunov V.A., Mastryukov B.S. [et al.]. – M.: Metallurgy, 1986. – 424 p.
12. Temperature stresses in conditions of high-speed jet heating of metal / P.G. Krasnokutskiy, V.A. Krievandin, V.I. Bezrukov, V.D. Olyak // Metallurgical production. 1983. No 11. P. 25-27.
13. Determination of admissible intensity of metal heating / P.G. Krasnokutskiy, V.A. Krievandin, V.D. Olyak, V.I. Bezrukov // Izv. vuz. Chёрnaya metallurgiya. 1984. No 7. P. 115-119.
14. Emelyanov V.A. Heat work of machines of continuous casting: textbook. – M.: Metallurgy, 1988. – 142 p.
15. Akimenko A.D. [et al.]. Mastering of continuous casting of steel. – L.: Sudpromgiz, 1960.
16. Kuznetsova N.P., Kraushkin N.A. Investigation of thermal regimes of solidification during semi-continuous casting of round steel ingots for production of seamless pipes // Izv. Vuz. Chёрnaya metallurgiya. 2014. No 3.

УДК 669.18

**Е. Е. Кузнецова, Г. В. Воронов, К. П. Левачева, И. В. Глухов**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **ОБРАЗОВАНИЕ СО В ДСП–80 ПРИ СКРАП-РУДНОМ ПРОЦЕССЕ, РАБОТАЮЩЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНОГО ГАЗА**

### **Аннотация**

*В данной работе рассмотрен тепловой режим современной дуговой сталеплавильной печи емкостью 80 тонн (ДСП–80). Произведен расчет горения влажного природного газа в двух случаях: окислитель – атмосферный воздух и технологический кислород. Также, определен соответственно расход окислителя (кислорода и влажного воздуха), количество продуктов сгорания, химический состав продуктов сгорания, балансовая температура с использованием i-t диаграммы и действительная температура для природного газа и по программе электронно-вычислительной машины (ЭВМ Microsoft Excel). Определены параметры диссоциации  $H_2O_{пар}$  и  $CO_2$  при условии сжигания природного газа в кислороде и в воздухе, с коэффициентом расхода окислителя  $\alpha_k$  и  $\alpha_v$ , равным 1,0 и 2,0. Предположен алгоритм расчета образования СО в высокотемпературной зоне печи.*

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, теплота сгорания, температура, природных газ, кислород, воздух, водяной пар, диоксид углерода, диссоциация.

### **Abstract**

*In this paper, the thermal regime of a modern arc steel furnace with a capacity of 80 tons (chipboard-80) is considered. The calculation of combustion of wet natural gas in two cases: oxidizer-atmospheric air and process oxygen. Also, the flow rate of the oxidizer (oxygen and humid air),*

the amount of combustion products, the chemical composition of the combustion products, the balance temperature using the I-t diagram and the actual temperature for natural gas and the program of the electronic computing machine (computer Microsoft Excel) are determined respectively. The dissociation parameters of  $H_2O_{par}$  and  $CO_2$  are determined under the condition of burning natural gas in oxygen and in air, with an oxidizer consumption coefficient  $\alpha_k$  and  $\alpha_b$  of 1.0 and 2.0. An algorithm is proposed for calculating the formation of CO in the high-temperature zone of the furnace.

**Key words:** arc steel-smelting furnace, combustion heat, temperature, natural gas, oxygen, air, steam, carbon dioxide, dissociation.

Современная дуговая сталеплавильная печь (ДСП) отличается от классической выплавкой качественного полупродукта стали при использовании различных видов энергоносителей. По тепловой работе такую печь следует рассматривать как комплексный объект, в котором используют электрическую энергию, газообразное топливо природный газ и окислитель технологический кислород. Включение горелочных устройств в работу печи связано с необходимостью интенсифицировать процессы нагрева и расплавления шихты, повысить энергоэффективность и производительность агрегата.

Устройство современной дуговой электропечи включает (рис. 1): механическую конструкцию; электрическую часть; оборудование подачи в рабочее пространство технологических газов, порошкообразных и кусковых материалов; систему эвакуации отходов производства и газоочистку; автоматизированную систему управления технологическим процессом. Основу конструкции печи составляет металлический кожух, который так же выполняет функцию каркаса. В нижней части кожуха имеет сферическую форму с небольшим выступом (эркером) на стороне сталевыпускного отверстия.

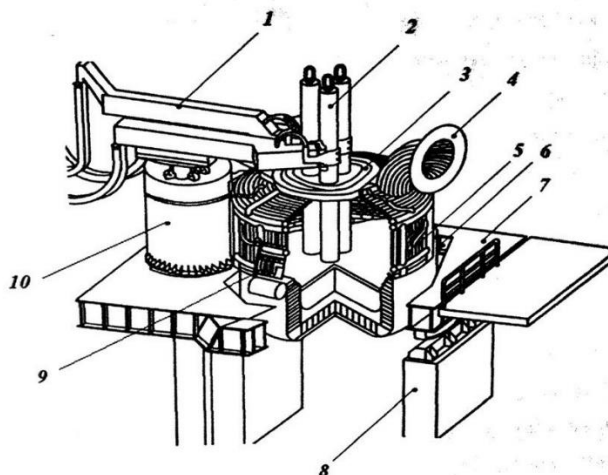


Рис. 1. Конструкция современной дуговой сталеплавильной печи (ДСП–80):

- 1 – электродержатели; 2 – графитированные электроды; 3 – свод печи;
- 4 – дымоотводящий канал; 5 – стена из водоохлаждаемых панелей;
- 6 – сталевыпускное отверстие (эркер); 7 – наклонная платформа;
- 8 – фундамент; 9 – технологическое окно; 10 – подъемно-поворотный механизм свода и электродов

Скрап-рудный процесс является одним из самых распространённых вариантов сталеплавильного процесса. Особенность его состоит в том, что основной составляющей металлической части шихты является чугун. Доля чугуна в шихте колеблется в пределах 50–70 % [1].

Дуговые сталеплавильные печи на мини предприятиях в чёрной металлургии служат основным агрегатом для получения жидкого металла, разливаемого на МНЛЗ и в слитки, предназначенные для последующей обработки на прокатном и кузнечном оборудовании [2].

В современной ДСП применяют природный газ для нагрева холодной шихты в рабочем пространстве с целью снижения (экономии) расхода электроэнергии. В данной работе рассмотрен расчет горения природного газа Березовско-Игримского месторождения с использованием технологического кислорода и атмосферного воздуха, с учетом диссоциации  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .

Химический состав влажного природного газа Березовско – Игримского месторождения:  $\text{CH}_4$  – 99,66 %;  $\text{C}_2\text{H}_6$  – 1,81 %;  $\text{C}_3\text{H}_8$  – 0,41 %;  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 0,17 %;  $\text{C}_5\text{H}_{12}$  – 0,1 %;  $\text{CO}_2$  – 0,57 %;  $\text{N}_2$  – 2,26 %;  $\text{H}_2\text{O}$  – 0,65 %.

Расчет выполнен по стехиометрическим реакциям горения компонентов углеводородов парафинового ряда [9] и представлен в таблице.

*Расчет количества оксида углерода в высокотемпературной зоне плавильных печей*

В случае отопления печи природным газом объемную скорость образования продуктов сгорания рассчитывают по выражению:

$$V_{\alpha} = \frac{V \cdot M_{\phi} \cdot Q_{\text{н.у.т}}^{\text{p}} \cdot V'_{\alpha}}{3600 \cdot Q_{\text{н.г}}^{\text{p}}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (1)$$

Здесь  $V$  – удельный расход условного топлива, кг у.т./т;  $M_{\phi}$  – производительность печи, т/ч;  $Q_{\text{н.г}}^{\text{p}}$  – теплота сгорания природного газа – 36445 кДж/м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{н.у.т}}^{\text{p}}$  – теплота сгорания условного топлива – 29310 кДж/кг;  $V'_{\alpha}$  – действительный объем продуктов сгорания, образующегося при горении природного газа и фактическом коэффициенте расхода воздуха  $\alpha_{\text{в}}$  или  $\alpha_{\text{к}}$ ;

Для расчета образующихся продуктов сгорания рекомендуют [6] следующее выражения:

$$V'_{\alpha} = \frac{182 \cdot \alpha - 56,0}{(O'_2)^{0,82} \cdot \alpha^{0,16}}, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2)$$

где  $O'_2$  – концентрация кислорода, подаваемого на горение природного газа с учетом подачи чистого кислорода в факел ( $V_{\text{к}}$ , м<sup>3</sup>/ч), компрессорного воздуха для подачи измельченного кокса ( $V_{\text{к.в.}}$ , м<sup>3</sup>/ч).

$$O'_2 = \frac{V_{\text{к}} + 0,21 \cdot V_{\text{к.в.}}}{V_{\text{к}} + V_{\text{к.в.}}} \cdot 100 \%. \quad (3)$$

В результате горения природного газа, концентрацию диоксида углерода в продуктах сгорания можно рассчитать по выражению:

$$\text{CO}'_2 = \frac{9,45}{\alpha}, \%$$

или

$$\text{CO}'_2 = \frac{0,01 \cdot (\text{CO}_2 + n \sum C_n H_{2n+2})}{V_{\alpha}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

При этом объемная скорость образования диоксида углерода составит:

$$v'_{CO_2} = 0.01 \cdot v_{\alpha} \cdot CO'_2, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (5)$$

и за счет выгорания углерода из шихты:

$$v''_{CO_2} = 5.148 \cdot 10^{-3} \cdot M_{\phi} \cdot (C_{\text{ш}} - C_{\text{м}}), \frac{\text{м}^3}{\text{с}}, \quad (6)$$

где  $C_{\text{ш}}$  – содержание углерода в железосодержащих компонентах и чугуна шихты – 2...3,5%;  $C_{\text{м}}$  – содержание углерода в готовом металле – 0,05...0,6 %.

Следовательно, суммарный объем скорости образования диоксида углерода в дымовых газах:

$$v_{CO_2} = V'_{CO_2} + V''_{CO_2}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (7)$$

и концентрация его в дымовых газах:

$$CO''_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{\alpha} + V''_{CO_2}} \cdot 100\%. \quad (8)$$

Содержание свободного кислорода в дымовых газах, который не прореагировал при горении топлива и углерода шихты (т.е. кислород, содержащийся в дымовых газах сверх стехиометрического количества, согласно реакциям горения):

$$O_2^C = O_2^И + O_2^{CO_2} + O_2^{H_2O}, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (9)$$

где  $O_2^И$  – избыточный кислород,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $O_2^{CO_2}$  – кислород от диссоциации  $CO_2$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $O_2^{H_2O}$  – кислород от диссоциации  $H_2O_{\text{пар}}$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Парциальное давление свободного кислорода составит:

$$P_{O_2^C} = 0.01 \cdot O_2^C.$$

Расчет по выражению (10) осуществляется для  $t_{\alpha}^6$  газовой среды рабочего пространства печи:

$$O_2^C = [(23,69 - 5,3 \cdot \alpha)] \cdot \ln \alpha + 65,8 \cdot 1.004^t \cdot 10^{-6}, \%. \quad (10)$$

Таким образом, в отводящих дымовых газах содержится свободный кислород  $O_2^C$  и диоксид углерода  $CO''_2$ . Согласно реакции:



которая при определённых условиях является обратимой и характеризует процесс диссоциации диоксида углерода. Константа равновесия этой реакции определяется парциальными давлениями соответствующих компонентов:

$$K = \frac{(P_{CO_2})^2}{(P_{CO})^2 \cdot P_{O_2}} \quad (12)$$

и может быть рассчитана по выражению [8] для температуры:

$$T = T_{\alpha}^6 \cdot \eta_{\text{пир}},$$

где  $\eta_{\text{пир}}$  – пирометрический коэффициент;

$$\lg K = \frac{29534}{T} - 9,15.$$

В свою очередь, константа равновесия связана со степенью диссоциации диоксида углерода ( $\alpha_1$ ), представляющей отношение числа распавшихся молей к исходному числу молей. Если, согласно реакции ( $CO + 0,5 \cdot O_2 = CO_2$ ), исходное число молей  $CO_2$  принять равным единице, тогда после завершения процесса диссоциации образуется молей  $CO$  – ( $n_{CO} = \alpha_1$ ), молей  $O_2$  –

( $n_{O_2} = 0,5 \cdot \alpha_1$ ) и останется молей  $CO_2$  – ( $n_{CO_2} = 1 - \alpha_1$ ). Суммарное число молей в системе составит:

$$\sum n_i = n_{CO} + n_{O_2} + n_{CO_2} = \alpha_1 + 0,5 \cdot \alpha_1 + (1 - \alpha_1) = 1 + 0,5 \cdot \alpha_1.$$

На основании этого парциальное давление соответствующего компонента после завершения процесса диссоциации можно записать:

$$P_{CO_2} = \frac{P(1-\alpha_1)}{1+0,5\alpha_1}; \quad (13, a)$$

$$P_{CO} = \frac{P \cdot \alpha_1}{1+0,5\alpha_1}; \quad (13, б)$$

$$P_{O_2} = \frac{0,5 \cdot P \cdot \alpha_1}{1+0,5\alpha_1}. \quad (13, в)$$

Здесь  $P$  – давление в газовой среде рабочего пространства печи, которое, в большинстве случаев соответствует атмосферному давлению 1,0.

Подставив выражения (12) в (13) и выполнив соответствующие преобразования, получим:

$$\frac{(1-\alpha_1)^2 \cdot (2+\alpha_1)}{P \cdot \alpha_1^3}, \quad (14)$$

откуда можно записать уравнение, позволяющее рассчитать степень диссоциации диоксида углерода ( $\alpha_1$ ):

$$\alpha_1^3 - \frac{3}{1-KP} \cdot \alpha_1 + \frac{2}{1-KP} = 0. \quad (15)$$

Для полученного значения  $\alpha_1$  (при  $P = 1,0$ ) рассчитывается парциальное давление оксида углерода (13, б) в отводящем дыме после завершения процесса диссоциации  $CO_2$  и объемная концентрация  $CO = P_{CO} \cdot 10^2, \%$ .

Учитывая, что плотность оксида углерода при нормальных условиях составляет  $\rho_{CO} = 1,25 \text{ кг/м}^3$ , рассчитываем основные показатели, характеризующие содержание  $CO$  в дымовых газах.

Объемная скорость образования  $CO$ :

$$v_{CO} = v_{CO_2} \cdot P_{CO} = v_{CO_2} \cdot CO \cdot 10^{-2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (16)$$

Массовая скорость образования  $CO$ :

$$M_{CO} = v_{CO_2} \cdot \rho_{CO} \cdot 10^3, \text{ г/с}. \quad (17)$$

Удельное количество  $CO$ :

$$m_{CO} = \frac{M_{CO} \cdot 3600}{M_{\phi}}, \text{ г/т стали}. \quad (18)$$

Массовая концентрация  $CO$ :

$$C_{CO} = \frac{M_{CO}}{V_{\alpha} + V_{CO_2}''}, 10^3, \text{ мг/м}^3 \text{ дымовых газов}. \quad (19)$$

Рассмотрим особенности расчета процесса диссоциации  $CO_2$  при обогащении дутья кислородом (т.е. при содержании  $O_2$  в КВС для горения больше 21 %).

Объемная скорость образования продуктов сгорания  $V_{\alpha}$ , природного газа  $V_{\alpha}^r$  рассчитывают по тем же выражениям, которые приведены выше, но вместо расчета  $O_2'$  по (3) задается фактическая концентрация кислорода в КВС для горения (т.е.  $O_2' > 21 \%$ ).

Для оценки концентрации диоксида углерода в продуктах сгорания вместо (4) рекомендуется выражение (при  $\alpha_K, \alpha_B = 1,0$  и  $\alpha_K, \alpha_B = 2,0$ ):

$$CO_2' = 0.3427 \cdot O_2' - 17.1058 \cdot \alpha + 18.179, \%. \quad (20)$$

Далее порядок расчета сохраняется, исключая определение балансовой температуры горения топлива ( $T_{\alpha}^6$ ), для расчета которой рекомендуется выражение (при  $\alpha_K, \alpha_B = 1,0$  и  $\alpha_K, \alpha_B = 2,0$ ):

$$T_{\alpha}^6 = 21,26 \cdot O_2' + 328,19 \cdot \alpha + 2290, \text{ К.} \quad (21)$$

Концентрация свободного кислорода в дымовых газах вместо (10) рассчитывается по выражению (при  $\alpha_K, \alpha_B = 1,0$  и  $\alpha_K, \alpha_B = 2,0$ ):

$$O_2^C = 0.1016 \cdot O_2' - 0.0261 \cdot \alpha + 0.6884, \% \quad (22)$$

За счет повышения концентрации кислорода в КВС увеличилось и парциальное давление кислорода  $P_{O_2^C} = O_2^C \cdot 10^{-2}$ , в связи с чем степень диссоциации диоксида углерода принимает новое значение ( $\alpha_2$ ), которое может быть определено из выражения:

$$\alpha_2^3 - \frac{3}{1 - KP - KP_{O_2^C}} \cdot \alpha_2 + \frac{2}{1 - KP - KP_{O_2^C}} = 0. \quad (23)$$

Таким образом, с учетом указанных корректив рассчитывается парциальное давление оксида углерода ( $P_{CO}$ ) в дымовых газах по (13,б) после завершения процесса диссоциации  $CO_2$ , объемная концентрация  $CO = P_{CO} \cdot 10^2$  и все остальные показатели:  $v_{CO}$  (16);  $M_{CO}$  (17);  $m_{CO}$  (18) и  $C_{CO}$  (19);

Результаты расчета представлены в таблице.

#### *Заключение*

В работе представлены результаты расчета горения природного газа, химический состав горючих компонентов которого состоит из углеводородов парафинового ряда  $C_nH_{2n+2}$ , с учетом диссоциации  $CO_2$  и  $H_2O$ .

Отмечено, что химический состав топлива и окислителя воздуха в справочной литературе и технической документации представляют на сухую пробу с указанием влагосодержания в  $г/м^3$  сухой газовой среды, поэтому в расчете сделан пересчет состава газа на действительное состояние с учетом содержания водяного пара. Расчет горения природного газа выполнен строго по стехиометрическим реакциям с учетом действительного состояния всех компонентов и при использовании технологического кислорода и влажного атмосферного воздуха с коэффициентом расхода равным 1,0 и 2,0. Балансовую температуру продуктов сгорания рассчитывали с использованием программы Microsoft Excel и по возможности по  $i-t$  диаграмме. Предложена методика расчета объемной и массовой скорости образования  $CO$  за счет диссоциации диоксида углерода не по табличным данным, а с использованием математической программы, учитывающей константу равновесия реакции. Результаты расчета дают возможность определить удельное количество  $CO$  г/т стали и массовую концентрацию  $CO$  г/м<sup>3</sup> дымовых газов для конкретной ДСП.

Таблица

Характеристика продуктов сгорания природного газа Березовско-Игримского месторождения с учетом диссоциации  
водяного пара ( $H_2O_{\text{пар}}$ ) и диоксида углерода ( $CO_2$ )

П а р а м е т р ы	Окислитель кислород (t <sub>k</sub> =20°C)																Окислитель воздух (t <sub>k</sub> =20°C)															
	Состав продуктов сгорания																Состав продуктов сгорания															
	при α=2,0								при α=1,0				при α=2,0				при α=1,0															
	t <sub>г</sub> <sup>0</sup> = 1573 (ЭВМ)				t <sub>г</sub> <sup>0</sup> = 2460 (по i-t диаграмме)				t <sub>г</sub> <sup>0</sup> = 2690 (ЭВМ)				t <sub>г</sub> <sup>0</sup> = 1993 (по i-t диаграмме)				t <sub>г</sub> <sup>0</sup> = 2050 (ЭВМ)				t <sub>г</sub> <sup>0</sup> = 1950 (по i-t диаграмме)				t <sub>г</sub> <sup>0</sup> = 1661 (ЭВМ)				t <sub>г</sub> <sup>0</sup> = 1580 (по i-t диаграмме)			
	Без диссоциации		С диссоциацией		Без диссоциации		С диссоциацией		Без диссоциации		С диссоциацией		Без диссоциации		С диссоциацией		Без диссоциации		С диссоциацией		Без диссоциации		С диссоциацией		Без диссоциации		С диссоциацией		Без диссоциации		С диссоциацией	
	м3/м3	%	м3/м3	%	м3/м3	%	м3/м3	%	м3/м3	%	м3/м3	%	м3/м3	%	м3/м3	%	м3/м3	%	м3/м3	%	м3/м3	%	м3/м3	%	м3/м3	%	м3/м3	%	м3/м3	%	м3/м3	%
CO <sub>2</sub>	1,036	12,058	1,028	11,96	1,036	12,06	0,508	5,12	1,036	31,20	0,451	11,95	1,036	12,06	0,961	11,37	1,036	9,665	0,875	7,39	1,036	9,665	0,945	8,76	1,036	9,665	1,015	9,46	1,036	9,665	1,029	9,60
H <sub>2</sub> O	2,012	23,058	2,012	23,41	2,012	23,06	1,701	17,15	2,012	60,59	1,655	43,86	2,012	23,06	1,765	20,89	2,012	18,77	1,926	16,26	2,012	18,77	1,958	18,14	2,012	18,77	1,999	18,62	2,012	18,77	2,012	18,76
N <sub>2</sub>	1,026	11,941	1,026	11,94	1,026	11,94	1,026	10,34	0,273	8,22	0,273	7,24	1,026	11,94	1,026	12,14	7,671	71,57	7,671	64,76	7,671	71,57	7,671	71,07	7,671	71,57	7,671	71,46	7,671	71,57	7,671	71,53
O <sub>2</sub> <sup>и</sup>	4,518	52,584	4,518	52,56	4,518	52,58	4,518	45,54	0	0	0	0,00	4,518	52,58	4,518	53,47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	—	—	—	—	—	—	0,159	1,60	—	—	0,169	4,48	—	—	0,022	0,52	—	—	0,041	0,35	—	—	0,026	0,24	—	—	0,006	0,06	—	—	—	—
H <sub>2</sub> <sup>и</sup>	—	—	—	—	—	—	0,319	3,22	—	—	0,342	9,06	—	—	0,044	0,45	—	—	0,083	0,70	—	—	0,052	0,48	—	—	0,012	0,11	—	—	—	—
O <sub>2</sub> <sup>CO<sub>2</sub></sup>	—	—	0,004	0,05	—	—	1,639	16,52	—	—	0,294	7,79	—	—	0,038	0,45	—	—	0,083	0,70	—	—	0,047	0,44	—	—	0,011	0,10	—	—	0,004	0,04
CO <sup>CO<sub>2</sub></sup>	—	—	0,008	0,09	—	—	0,051	0,51	—	—	0,589	15,61	—	—	0,076	0,90	—	—	1,167	9,85	—	—	0,094	0,87	—	—	0,021	0,20	—	—	0,008	0,07
O <sub>2</sub> <sup>C</sup>	—	—	4,522	52,61	—	—	6,316	63,66	—	—	0,463	12,27	—	—	4,600	54,44	—	—	0,124	1,05	—	—	0,073	0,68	—	—	0,017	0,16	—	—	0,004	0,04
V <sub>α</sub>	8,592	100	8,596	100	8,592	100	9,921	100	3,321	100	3,773	100	8,592	100	8,450	100	10,72	100	11,846	100	10,919	100	10,793	100	10,72	100	10,735	100	10,919	100	10,724	100
α <sub>H<sub>2</sub>O</sub> , %	—	—	—	—	—	—	—	15,45	—	—	—	17,75	—	—	—	2,30	—	—	—	4,29	—	—	—	2,68	—	—	—	0,63	—	—	—	—
β <sub>CO<sub>2</sub></sub> , %	—	—	—	0,75	—	—	—	50,93	—	—	—	56,50	—	—	—	7,26	—	—	—	15,50	—	—	—	8,75	—	—	—	1,99	—	—	—	0,70

$$O_2^C = O_2^H + O_2^{CO_2} + O_2^{H_2O}, \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

## Список использованных источников

1. Бигеев А.М. Металлургия стали: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1998. – 480 с.
2. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева. Учебник для вузов // А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердов, А.М. Кручинин [и др.]; под ред. А.Д. Свенчанского. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.
3. Voronov G.V. Aspects of the aerodynamics in the working space of a modern electric-arc steelmaking furnace / G.V. Voronov, M.V. Antropov, O.V. Porokh // Refractories and Industrial Ceramics. 2014. Vol. 55, № 4. P. 285-287.
4. Воронов Г.В. Газодинамика рабочего пространства современной дуговой сталеплавильной печи / Г.В. Воронов, М.В. Антропов, И.В. Глухов // Новые огнеупоры. 2014. № 11. С. 23-25.
5. Гудим Ю.А. Производство стали в дуговых печах. Конструкции, технология, материалы: монография / Ю.А. Гудим, И.Ю. Зинуров, А.Д. Киселёв. – Новосибирск: НГТУ, 2010. – 547 с.
6. Старцев В.А. Скрап-карбюраторный процесс при производстве стали в мартеновских печах / В.А. Старцев, Г.В. Воронов, В.И. Лобанов [и др.]. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2004. – 225 с.
7. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е издание, дополнительное и переработанное. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
8. Рыженков Д.И. Расчеты металлургических процессов на ЭВМ / Д.И. Рыженков, С.Н. Падерин, Г.В. Серов, Л.К. Жидков. – М.: Металлургия, 1987. – 257 с.

УДК 662.76

**И. П. Лазебный, П. С. Филиппов, А. Ф. Рыжков**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПГУ С ВНУТРИЦИКЛОВОЙ ГАЗИФИКАЦИЕЙ

### Аннотация

*В этой статье с помощью программы Aspen Plus моделируется ПГУ с внутрицикловой газификацией с использованием различных конструкций. Модели проверяются соответствующими данными из реальных существующих станций или справочных данных из литературы. Модель состоит из трех отдельных блоков, соединенных воедино. Первый блок состоит из газификатора, который вырабатывает синтез-газ из твердого топлива для сжигания его в газотурбинной установке. Второй и третий блоки представляют из себя паровую и газотурбинную части станции, соответственно. В них происходит процесс выработки электрической энергии. Моделирование внутростанционных процессов показывает некоторые про-*